

文章编号: 1007-2284(2020)06-0092-06

# 生物炭对土壤团聚体和钾素的影响

王亚琼<sup>1,2,3</sup>, 牛文全<sup>1,4</sup>, 王 婕<sup>3</sup>, 李学凯<sup>3</sup>, 鄢梦龙<sup>3</sup>, 董继红<sup>5</sup>

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 5. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 为探究生物炭对土壤结构和肥力的影响, 在土壤中添加 5 种不同比例的生物炭, 分别为 10、30、50、70、90 t/hm<sup>2</sup>, 以不添加生物炭作为对照试验, 从土壤团聚体组成和土壤钾离子含量变化, 分析土壤团聚体结构、不同状态钾素含量。结果表明: 在杨凌地区, 添加生物炭后, 土壤机械稳定性团聚体结构发生变化, 土壤 0.5~0.25 mm、5~3 mm、7~5 mm 粒径机械稳定性团聚体含量显著改变。生物炭提升机械稳定性团聚体稳定性。但是生物炭对土壤水稳性团聚体稳定性未见显著改变。生物炭施用量和土壤速效、有效、交换性、水溶性钾表现为指数相关关系。添加生物炭后, 生菜显著增产, 单棵植株重量增加了 0.33~2.23 g。考虑到购买生物炭的成本, 陕西杨凌地区, 推荐在土壤中添加 30 或 50 t/hm<sup>2</sup> 生物炭。

**关键词:** 生物炭; 团聚体; 钾素

中图分类号: S156.2 文献标识码: A

## Effects of Biochar on Soil Aggregates and Potassium

WANG Ya-qiong<sup>1,2,3</sup>, NIU Wen-quan<sup>1,4</sup>, WANG Jie<sup>3</sup>, LI Xue-kai<sup>3</sup>, WU Meng-long<sup>3</sup>, DONG Ji-hong<sup>5</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, Yangling 712100, Shaanxi Province, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Yangling 712100, Shaanxi Province, China; 4. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China;

5. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi Province, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of biochar on soil structure and fertility, five biochar additions, 10, 30, 50, 70, 90 t/hm<sup>2</sup>, were selected with a 0 t/hm<sup>2</sup> as the control treatment. The soil structure and the status of potassium are analyzed from the perspective of soil aggregates combination and different kinds of soil potassium contents. The results show that the biochar affects the structure of soil mechanical stability agglomeration of Yangling, and significantly changes the mechanical stability aggregate combinations whose sizes are 0.5~0.25, 5~3 and 7~5 mm. Biochar increases the stability of soil mechanical agglomerates. However, biochar has no significant effect on the stability of water-stable aggregates. Available potassium ions, effective potassium, exchangeable potassium ions and water-soluble potassium ions are exponentially related to biochar additions. Biochar increases lettuce yield significantly, with every plant added 0.33 to 2.23 g. Considering the cost of biochar, it is wise to use 30 or 50 t/hm<sup>2</sup> biochar in Yangling area in Shaanxi.

**Key words:** biochar; agglomerate; potassium

收稿日期: 2019-05-27

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0400202); 国家自然科学基金项目(51679205)。

作者简介: 王亚琼(1993-), 女, 硕士, 主要从事水土资源高效利用研究。E-mail: wangyaqiong16@mails.ucas.ac.cn。

通讯作者: 牛文全(1972-), 男, 博士, 主要从事灌溉理论与节水技术研究。E-mail: nwq@nwafu.edu.cn。

多年来, 随着生态环境的恶化和人民环境保护意识的提高, 土地资源的紧缺引起了人们的密切关注, 研究学者也越来越关注土壤退化问题。日光温室大棚种植和管护技术的推广与发展, 是缓解土地问题的一种途径。相比于露天土地, 大棚土壤结构更容易受到破坏, 出现养分流失和土壤盐分累积, 土壤结构愈加脆弱。为了削减土壤退化造成的经济损失, 农民通常将大棚外的优质、肥沃土壤替换大棚内的退化土壤。通常购买、替换这些退化土壤需要投入较大的经济和人工成本, 不能

从根本上治疗大棚土壤“疾病”。因此大棚土壤的改良方法引起了相关学者的广泛关注。

土壤的水、肥、气、热状况与土壤结构密切相关,土壤团聚体又是土壤结构的基本组成部分。生物炭表面大小不一的孔隙赋予了生物炭较大的比表面积和吸附微小物质的能力,为改良土壤性质和结构提供了可能。生物炭改变土壤物理和化学性质,调节土壤孔隙数量和比例,改变土壤粒径组成,影响土壤碳库循环和微生物活动,改变土壤团聚体粒径大小和组成<sup>[1,2]</sup>。生物炭在土壤中经历复杂的过程后才影响大棚土壤团聚体结构。生物炭改变土壤微生物群落结构,影响微生物的繁殖过程,增加土壤胶结物质。胶结物质可以促进团聚体的形成,土壤胶结物质又和微生物活动密切相关。目前,生物炭对改良土壤团聚体结构的作用还存在一定争议<sup>[3]</sup>。因生物炭的原材料、制作方式相差巨大,不同类型生物炭的性质也具有较大差异<sup>[4]</sup>。并且,各地土壤的种类、性质相差各异。这也是生物炭对团聚体改良作用存在争议的原因。

土壤团聚体结构影响土壤的保肥能力,钾肥是三大土壤肥料之一。我国的钾肥使用现状堪忧,各地钾肥施用量相差极大。在某些地区,人们不注重钾肥的使用,钾肥施用量偏少,导致土壤严重缺钾<sup>[5]</sup>。随着耕作年限的增加,土壤养分的流失,人们为了提高作物产量,要在土地中施入大量钾肥<sup>[6]</sup>。虽然钾肥使用量不断增加,但是我国钾盐的数量却极少,还不到全球总储量的3%,远远小于俄罗斯、加拿大等国家<sup>[7]</sup>。因此人们迫切需要发现一种可再生物质代替钾肥。生物炭具有替代钾肥的潜力。生物炭表面具有大量的钾元素,有补充土壤钾素的能力。

日常生活时,人类会不断地制造垃圾废料,须采取措施来弥补废弃物对环境造成的生态破坏。但是,生活废弃物可以作为生物炭的原始材料来加以利用,变废为宝。为研究生物炭施用量对土壤团聚体粒径组成和土壤钾素含量转化,本试验在日光大棚开展盆栽试验,确定生物炭在陕西杨凌示范区的推荐使用量。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验设置于陕西省杨凌高新技术示范区寨西村(108.02°E, 34.17°N)的日光大棚内。月降水量3.6~140 mm,相对湿度59%,月均气温2.7~30.5℃,气压96.91 kPa,日照时数34.3~290.9 h。

### 1.2 试验设置

果木生物炭购于陕西亿鑫能源科技有限公司,比表面积为87.1 m<sup>2</sup>/g,是果树枝干在高温下裂解8h制成。在土壤中添加5个梯度的生物炭施用量分别为90、70、50、30、10 t/hm<sup>2</sup>,记做T90、T70、T50、T30、T10(即分别将29.08、22.62、16.16、9.69和3.21 g生物炭添加到1 kg土壤样品中)。对照试验是不添加生物炭处理,记为T0。不同生物炭添加量各设置4个重复处理。为了保持试验光照、湿度等因素相同,在日光温室大棚中开展试验。试验用土取于日光大棚内,充分搅拌均匀,过筛后备用。土壤有机质本底值为16.48 g/kg。生物炭与供试土壤的粒径分布和化学性质见表1。

表1 生物炭与供试土壤的粒径分布和化学性质

Tab.1 Particle size distribution and chemical properties of biochar and applied soil

样品	粒径分布/%			化学性质				pH
	<0.002 mm	0.002~0.02mm	0.02~2 mm	全钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	交换性钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	水溶性钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	
生物炭	14.83	31.99	53.19	120.51	54 085.06	10 902.43	103 427.32	10.51
供试土壤	30.39	34.73	34.88	23.74	496.73	93.9	520.25	7.93

将生物炭、试验用土人工混合均匀后装入体积为0.02 m<sup>3</sup>的圆桶中,装填20 cm。试验作物采用生菜(Var. ramosa Hort),每桶放入30颗生菜种子,定植时拔掉24棵,于2018年5月24日开始试验,2018年7月22日结束试验,历时60 d。每15 d取土样一次,共取4次。经过数据预处理发现采样时间对土壤团聚体影响的差异较小,不考虑时间对团粒稳定性的影响。

### 1.3 测定方法

#### 1.3.1 土壤团聚体测定方法

参照《土壤理化分析》<sup>[8]</sup>,采用人工筛分方法测定土壤团聚体结构组成,分别用干筛法和湿筛法分析土壤机械稳定性团聚体和水稳性团聚体。干筛法:将土样人工掰为1~1.2 cm大小,置于阴凉处风干后,用自下而上粒径分别为0.025、0.05、0.1、0.3、0.5、0.7、1 cm的筛网分级。湿筛法:按各级机械稳定性团聚体比例配成50 g待测土样。为了防止细小土粒阻塞筛孔,剔除土样中粒径<0.25 mm土粒。把所配土样置于沉降筒中,用水湿润直至土样达到饱和。10 min后,沿沉降筒壁灌入水,筒口用橡皮塞塞紧,将沉降筒上下颠倒10次。把混合样倒入

自下而上粒径分别为0.025、0.05、0.1、0.2、0.3、0.5 cm的筛网,将筛网置于水中,缓慢提升一段距离后迅速下落,重复10次,取出粒径为0.5、0.3、0.2 cm的筛网。以洗净附着在水稳性团聚体表面的颗粒,剩余三个筛子重复筛分三次方可取出。将各粒径筛网上的团聚体收集至铝盒,烘干称重。

衡量团聚体稳定性的指标有平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、团聚体破坏率(PAD)等。MWD是将各级团聚体质量加权平均。GMD基于土壤团粒对数-正态分布,是一半土壤团聚体通过筛网时的直径。PAD表征团聚体在水力破坏下的分散程度,PAD越大,土壤团粒结构性越破碎。PAD、GMD、MWD,计算方式如下:

$$GMD = \exp \sum (W_i \log \bar{R}_i / W_s) \quad (1)$$

$$PAD = \frac{D_{>0.25 \text{ mm}} - W_{>0.25 \text{ mm}}}{D_{>0.25 \text{ mm}}} \times 100\% \quad (2)$$

$$MWD = \frac{\sum (\bar{R}_i W_i)}{W_s} \quad (3)$$

式中:W<sub>i</sub>为某粒径范围内水稳性团聚体质量,g;W<sub>s</sub>为待测土样

的质量  $g$ ;  $\bar{R}_i$  为某粒径范围内团聚体平均直径,  $mm$ ;  $W_{>0.25\text{ mm}}$  为粒径大于  $0.25\text{ mm}$  水稳性团聚体含量,  $mg/kg$ ;  $D_{>0.25\text{ mm}}$  为粒径大于  $0.25\text{ mm}$  机械稳定性团聚体含量,  $mg/kg$ 。

### 1.3.2 土壤钾素测定方法

土壤钾离子均采用火焰光度计测定,具体方法参考《土壤农化分析》<sup>[9]</sup>:

水溶性钾离子采用土水比为  $1:5$  浸提,取过  $1\text{ mm}$  筛网土样  $10.0\text{ g}$  于锥形瓶中,加入  $50\text{ mL}$  蒸馏水,震荡  $3\text{ min}$  后过滤。取  $20\text{ mL}$  滤液和  $1\text{ mL}$  硫酸铝于  $50\text{ mL}$  容量瓶中,定容,取样后,备用。

速效钾和交换性钾离子都采用中性乙酸铵溶液浸提,速效钾采用振荡法,交换性钾离子采用离心法。交换性钾离子测定:取过  $2\text{ mm}$  筛网土样  $1.0\text{ g}$  于离心管中,加  $30\text{ mL}$  中性乙酸铵溶液,将离心管置于离心机中离心  $4\text{ min}$ ,共离心  $5$  次,将上层清液用乙酸铵溶液定容至  $50\text{ mL}$ 。

速效钾测定方法:在试管中加入自然风干土样  $2.50\text{ g}$ ,再倒入  $50\text{ mL}$  中性乙酸铵溶液,在振荡机上震荡、过滤。取样后,备用。

有效钾离子采用冷稀硝酸浸提。在试管中加入风干土样  $2.500\text{ g}$ ,取  $50\text{ mL}$  冷的  $2\text{ mol/L}$  硝酸于试管中,在振荡机上震荡后,立刻用定量滤纸过滤。

### 1.4 数据处理

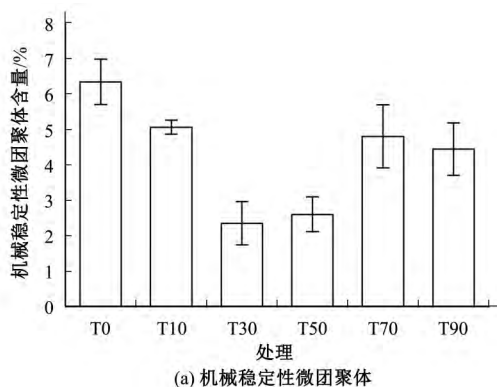
方差分析采用 Duncan 方差统计,用 WPS 软件制作数据

表 2 生物炭施用量对土壤大团聚体结构的影响

Tab.2 Biochar additions affect the structure of soil large aggregates

处理	大团聚体含量/%						
	大于 $10\text{ mm}$	$10\sim 7\text{ mm}$	$7\sim 5\text{ mm}$	$5\sim 3\text{ mm}$	$3\sim 1\text{ mm}$	$1\sim 0.5\text{ mm}$	$0.5\sim 0.25\text{ mm}$
T0	$34.22\pm 1.54a$	$6.11\pm 0.39ab$	$8.00\pm 1.18a$	$6.90\pm 1.07b$	$10.67\pm 2.18a$	$13.68\pm 2.06c$	$14.00\pm 0.83ab$
T10	$37.36\pm 1.81a$	$5.29\pm 1.08b$	$6.63\pm 0.68b$	$6.67\pm 0.77b$	$12.84\pm 0.71a$	$14.37\pm 1.88bc$	$11.78\pm 0.99b$
T30	$35.01\pm 1.71a$	$6.44\pm 1.52ab$	$7.83\pm 1.68a$	$7.99\pm 1.36ab$	$12.93\pm 0.65a$	$15.25\pm 1.17abc$	$12.20\pm 2.01b$
T50	$30.43\pm 3.13a$	$6.86\pm 1.00a$	$8.24\pm 0.66a$	$9.08\pm 1.26a$	$13.06\pm 1.80a$	$15.97\pm 1.80abc$	$13.7\pm 2.24ab$
T70	$29.32\pm 0.58a$	$6.23\pm 0.93ab$	$7.43\pm 0.26ab$	$7.20\pm 0.52ab$	$12.46\pm 0.88a$	$17.57\pm 1.47a$	$14.98\pm 0.48a$
T90	$28.40\pm 1.49a$	$5.79\pm 1.96ab$	$7.76\pm 0.60a$	$7.98\pm 1.19ab$	$13.03\pm 2.06a$	$17.38\pm 0.96ab$	$15.22\pm 0.10a$

粒径小于  $0.25\text{ mm}$  的机械稳定性团聚体是机械稳定性微团聚体,粒径大于  $0.25\text{ mm}$  的团聚体是机械稳定性大团聚体。



表、图。

## 2 数据分析

### 2.1 生物炭施用量对土壤团聚体结构的影响

#### 2.1.1 生物炭施用量对土壤机械稳定性团聚体结构的影响

大团聚体为粒径大于  $0.25\text{ mm}$  的团聚体。表 2 为不同生物炭添加量对土壤机械稳定性团聚体的影响。添加生物炭后,土壤大团聚体数量升高。土壤粒径  $0.5\sim 0.25$ 、 $5\sim 3$ 、 $7\sim 5\text{ mm}$  粒径团聚体含量明显发生变化 ( $P<0.05$ )。随着土壤中生物炭施用量减少,土壤最大粒径机械稳定性团聚体呈现出先增加后降低趋势。当生物炭施用量大于等于  $50\text{ t/hm}^2$  时,最大粒径机械稳定性团粒含量降低;施用  $10$  或  $30\text{ t/hm}^2$  生物炭时,粒径大于  $10\text{ mm}$  机械稳定性团聚体含量较对照试验增多。当生物炭施用量较大时,  $5\sim 3\text{ mm}$  粒径机械稳定性团粒含量升高,其中  $50\text{ t/hm}^2$  生物炭处理含量为  $9.08\%$ ,增幅最大。生物炭提高土壤  $3\sim 1\text{ mm}$  粒径机械稳定性团聚体含量,其中  $70\text{ t/hm}^2$  生物炭施用量的含量为  $12.46\%$ ,增加最少;  $50\text{ t/hm}^2$  生物炭施用量含量最多,为  $13.06\%$ 。在土壤中添加生物炭后,粒径为  $1\sim 0.5\text{ mm}$  土壤机械稳定性团聚体含量上升,施用  $70\text{ t/hm}^2$  生物炭含量最高,为  $17.57\%$ ;施用  $10\text{ t/hm}^2$  生物炭含量为  $14.37\%$ ,增幅最小。随着生物炭施用量的减少,粒径为  $0.5\sim 0.25\text{ mm}$  机械稳定性团聚体含量先减小后上升,其中, T90 处理含量最高,为  $15.22\%$ ; T10 处理含量最少,为  $11.78\%$ 。

图 1 为在土壤中施用生物炭后,机械稳定性大团聚体、微团聚体的含量变化。生物炭显著影响土壤机械稳定性团聚体含量

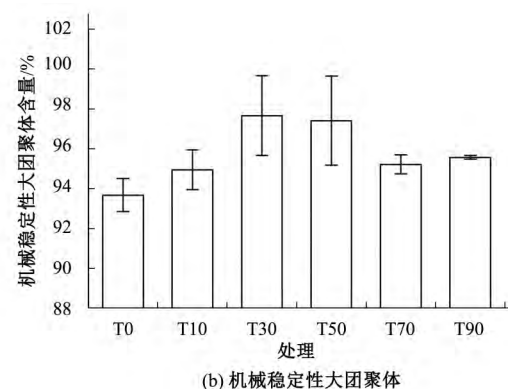


图 1 生物炭施用量对土壤机械稳定性微团聚体和大团聚体的改变作用

Fig.1 Biochar change the content of soil microaggregate and agglomerate

( $P<0.05$ )。施用生物炭后,机械稳定性微团聚体含量显著下降,施用  $30\text{ t/hm}^2$  生物炭机械稳定性微团聚体含量最少,为  $2.35\%$ 。施用生物炭后,土壤机械稳定性大团聚含量显著增加( $P<0.05$ ),其中 T30 处理含量最高,为  $97.65\%$ 。

2.1.2 生物炭对土壤水稳性团聚体含量的影响

$0.5\sim 0.25, 1\sim 0.5\text{ mm}$  粒径水稳性团聚体含量受生物炭添加量影响显著( $P<0.05$ )。使用生物炭后,土壤  $5\sim 3\text{ mm}$  粒径水稳性团聚体含量下降,其中 T10 处理含量为  $0.28\%$ ,减少幅度

最大;T90 处理含量为  $0.62\%$ ,减少幅度最小。随着生物炭施用量的下降,土壤中  $2\sim 1\text{ mm}$  水稳性团聚体比例表现为先减小后增加趋势,T10 处理含量最少,为  $1.18\%$ ;T90 处理含量最高,为  $1.39\%$ 。随着在土壤中施用的生物炭量减少,土壤  $1\sim 0.5\text{ mm}$  粒径水稳性团聚体数量表现出先下降后升高趋势,T10 处理含量最少,为  $2.99\%$ ,T90 处理含量最高,为  $4.17\%$ 。施用生物炭后,土壤  $0.5\sim 0.25\text{ mm}$  粒径团聚体含量具有下降的趋势,实验结果见表 3。

表 3 生物炭对土壤水稳性团聚体的影响

Tab.3 Effect of Biochar on Soil Water stable aggregate content

处理	水稳性团聚体含量/%						
	>5 mm	5~3 mm	3~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
T0	0.42±0.07a	1.01±0.81a	0.49±0.12a	1.29±0.32a	3.05±0.26c	17.33±3.08a	76.42±2.96a
T10	0.21±0.36a	0.28±0.12b	0.52±0.20a	1.18±0.20a	2.99±0.74c	12.14±0.68c	82.68±0.38a
T30	0.41±0.53a	0.59±0.38ab	0.55±0.09a	1.19±0.10a	3.11±0.70bc	14.59±2.45bc	79.57±2.84a
T50	0.42±0.07a	0.58±0.16ab	0.54±0.05a	1.28±0.16a	3.11±0.36bc	15.52±1.79abc	78.56±2.27a
T70	0.36±0.32a	0.52±0.24ab	0.55±0.14a	1.32±0.15a	3.71±0.70ab	16.05±1.39ab	77.50±2.44a
T90	0.17±0.17a	0.62±0.49ab	0.49±0.12a	1.39±0.06a	4.17±0.36a	17.43±0.16a	75.74±1.12a

表 4 是生物炭施用量对土壤结构稳定程度的影响。生物炭对土壤结构的稳定程度未见显著影响。但是,施用生物炭减小团聚体几何平均直径,其中施用  $50\text{ t/hm}^2$  生物炭团聚体几何平均直径降幅最小;施用  $90\text{ t/hm}^2$  生物炭几何平均直径降低幅度最大。

表 4 生物炭对土壤稳定性指标的影响

Tab.4 Effect of biochar on soil stability index

处理	GMB/mm	MWD/mm	PAD/%
T0	0.470±0.010a	0.249±0.006a	79.10±0.018a
T10	0.455±0.049a	0.244±0.013a	80.54±0.035a
T30	0.462±0.059a	0.263±0.012a	79.08±0.035a
T50	0.466±0.008a	0.268±0.004a	77.49±0.017a
T70	0.464±0.034a	0.247±0.007a	76.86±0.034a
T90	0.461±0.040a	0.272±0.023a	80.74±0.115a

2.2 生物炭对土壤钾含量的影响

2.2.1 生物炭对土壤水溶性钾离子的影响

图 2 为生物炭对土壤水溶性钾离子的增加作用。施用生物炭后,土壤水溶性钾离子含量显著上升( $P<0.05$ ),并且生物炭施用量越多,土壤水溶性钾离子含量越高。第 15 d,施用生物炭后,土壤水溶性钾离子含量为  $68.74, 151.53, 197.92, 269.47, 396.73\text{ mg/kg}$ ,第 30 d 与未添加生物炭相比,添加生物炭后,土壤中的水溶性钾离子含量较对照试验分别增加  $18.42\%, 100.93\%, 136.70\%, 236.11\%, 476.24\%$ ;第 45 d 较对照试验分别增加  $170.20\%, 571.77\%, 618.99\%, 976.79\%, 1531.54\%$ ;第 60 d 土壤中的水溶性钾离子较对照试验分别增加  $60.80\%, 169.40\%, 229.75\%, 405.38\%, 504.13\%$ 。在土壤中施用的生物炭越多,土壤水溶性钾离子含量越高。

2.2.2 生物炭对土壤交换性钾离子含量的影响

交换性钾离子是土壤交换性阳离子的一种,是土壤胶体可

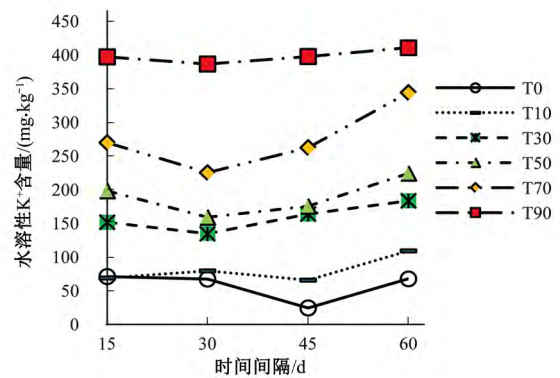


图 2 生物炭施用量改变土壤水溶性钾离子含量

Fig.2 Biochar additions change soil water-soluble potassium ions contents

以吸附的钾离子的总量。图 3 是施用生物炭改变土壤中交换性钾离子含量。在土壤中使用生物炭明显改变土壤交换性钾离子含量( $P<0.05$ )。第 15 天,不同生物炭处理,土壤速效钾含量分别增加  $12.20\%, 52.36\%, 72.92\%, 138.79\%, 191.08\%$ 。施

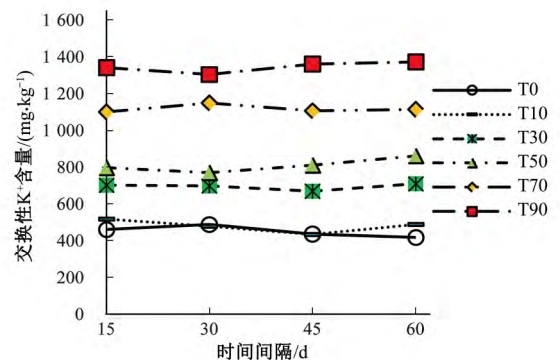


图 3 生物炭施用量对土壤交换性钾离子含量的影响

Fig.3 Effect of biochar contents on soil exchangeable potassium ion content

用生物炭后,第30 d土壤的交换性钾离子含量分别为476.33~1 303.46 mg/kg;第45 d分别为432.35~1 359.29 mg/kg。第60 d施用生物炭后,土壤交换性钾离子分别增加了16.66%、69.69%、105.95%、166.23%、228.03%。土壤交换性钾离子含量随着生物炭施用量的增加而增加。

2.2.3 生物炭对土壤速效钾离子含量的影响

速效钾指植物容易吸收利用的土壤中的钾素。图4是生物炭施用量对土壤速效钾离子含量的影响。施用生物炭后,土壤速效钾离子含量显著改变( $P<0.05$ )。施用生物炭后,土壤速效钾离子含量明显提高。与对照试验相比,添加70 t/hm<sup>2</sup>生物炭后,土壤速效钾离子含量是对照试验的2.29~2.53倍;施用90 t/hm<sup>2</sup>生物炭后,速效钾离子含量是对照的2.67~3.15倍。

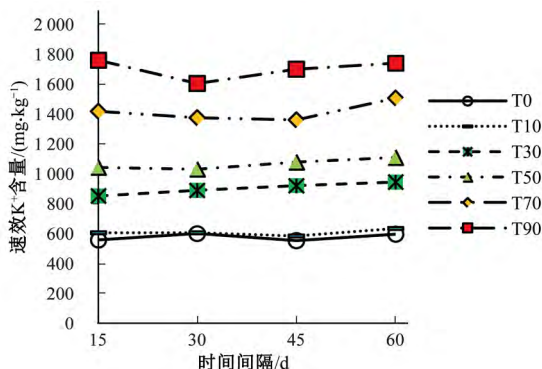


图4 生物炭改变土壤速效钾离子含量

Fig.4 Biochar additions change available potassium ion contents in soil

2.2.4 生物炭对土壤有效钾离子含量的影响

图5为施用生物炭对土壤中有效钾离子的影响。施用生

物炭后,土壤有效钾离子含量显著改变( $P<0.05$ )。当生物炭施用量大于10 t/hm<sup>2</sup>时,土壤有效钾离子含量显著升高,并且生物炭施用量越大,有效钾离子含量越高。施用后生物炭后,第15 d土壤有效钾离子是对照试验的1.03~2.49倍。其中,施用90 t/hm<sup>2</sup>生物炭,增加量最少,增加了3.43%;施用10 t/hm<sup>2</sup>生物炭,增加量最多,是未添加生物炭处理的2.49倍。第30 d,土壤有效钾离子含量分别为795.85、790.40、1 117.98、1 281.78、1 627.62、1 948.14 mg/kg,第45 d土壤有效钾离子含量分别为791.74、782.77、1 096.62、1 297.03、1 646.66、1 938.84 mg/kg,第60 d增幅分别为6.56%、49.84%、79.96%、130.07%、169.46%。不同取土时间下,均是T90处理增幅最大。

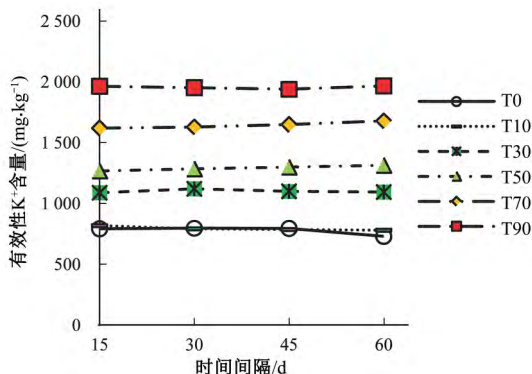


图5 生物炭改变土壤有效钾离子含量

Fig.5 Biochar additions change effective potassium ion contents in soil

2.2.5 生物炭对土壤钾离子含量的指数关系

生物炭施用量以指数关系改变土壤钾素含量见表5。

通过软件拟合,土壤钾离子含量与土壤生物炭施用量显著

表5 生物炭施用量以指数关系改变土壤钾素含量

Tab.5 The potassium content of soil was changed exponentially by biochar

时间间隔/ d	速效钾		交换性钾		有效钾		水溶性钾	
	指数关系	R <sup>2</sup>	指数关系	R <sup>2</sup>	指数关系	R <sup>2</sup>	指数关系	R <sup>2</sup>
15	$y = 408.09 e^{0.24}$	0.99	$y = 351.35 e^{0.22}$	0.99	$y = 604.19 e^{0.20}$	0.98	$y = 43.21 e^{0.57}$	0.95
30	$y = 448.82 e^{0.21}$	0.97	$y = 351.41 e^{0.22}$	0.95	$y = 604.75 e^{0.20}$	0.97	$y = 43.12 e^{0.55}$	0.98
45	$y = 414.77 e^{0.26}$	0.97	$y = 305.41 e^{0.25}$	0.97	$y = 597.36 e^{0.20}$	0.97	$y = 21.09 e^{0.52}$	0.92
60	$y = 446.68 e^{0.25}$	0.98	$y = 320.27 e^{0.25}$	0.99	$y = 559.35 e^{0.21}$	0.98	$y = 52.95 e^{0.56}$	0.98

相关( $P<0.01$ ),且遵循的指数相关关系。表5为不同取土时间时生物炭施用量与土壤钾素的指数相关关系拟合结果。土壤钾素含量与生物炭施用量之间不表现出线性关系,而是指数相关。随着生物炭施用量的升高,土壤钾素增幅变快,斜率变陡。当施用较少生物炭时,土壤钾素含量增加,但是增加幅度较小,斜率较缓;当施用较多生物炭时,土壤钾素含量上升较快。

2.3 生物炭对生菜产量的影响

图6为不同生物炭施用量对生菜产量的影响。不同生物炭添加量处理,生菜的单株质量分别增加7.05%、22.01%、37.52%、42.74%、47.42%、47.42%,生物炭显著增加生菜产量( $P<0.05$ )。T90处理植株鲜重最大,为6.93 g;对照处理植株鲜重最小,为4.70 g。

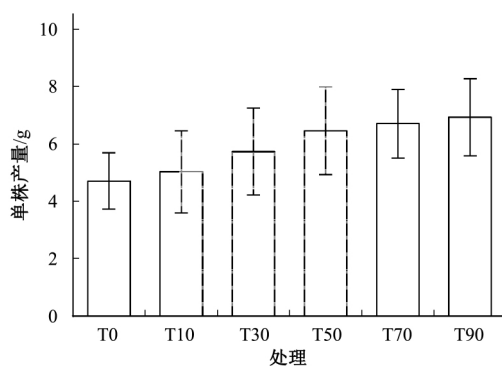


图6 生物炭增加生菜单株产量

Fig.6 Biochar additions increase the output of each lettuce

### 3 讨 论

生物炭具有改良土壤团粒结构的作用。施用生物炭后,土壤微生物代谢活动发生变化。微生物分泌的菌丝促使土壤微小颗粒抱团为土壤大颗粒物。生物炭提高土壤中水稳性大团聚体比例,生物炭改变土壤孔隙结构,影响土壤基本物理性质,促进水稳性大团聚体形成。

施用生物炭后,土壤水溶性钾离子含量增加显著,原因是生物炭调节土壤孔隙比例,也可能是生物炭表面通常含有较多的水溶性和不可溶性钾离子。生物炭还可以通过物理作用和化学作用吸附土壤中的钾离子<sup>[10]</sup>。施用生物炭后,土壤速效钾离子含量迅速上升,可能原因是,本次试验采用的生物炭原料为果木枝干,生物炭自身携带与植物生长密切相关的营养物质,表面含有一定数量的钾素。也可能是施加生物炭后,改变土壤水分运移,土壤含水量和土壤速效钾含量息息相关。生物炭显著影响盆栽试验中的交换性钾离子比例。当在土壤中添加较少生物炭,土壤交换性钾离子之间的差异很小;施用越多生物炭,土壤交换性钾离子越高。可能是低量生物炭很难改变土壤物理结构,因而少量生物炭未见明显改变土壤钾素比例。还可能是土壤温度因生物炭施用量不同而改变。交换性钾离子含量受土壤温度影响,温度影响盐土矿物对土壤中钾离子的吸附和固定<sup>[11]</sup>。施用生物炭后,土壤有效钾离子比例增加显著,或许是土壤酸碱度受生物炭施用量影响,加快土壤钾素转化速率;也或许是生物炭提高土壤湿度,活化土壤中的非交换性钾。把生物炭施入土壤后,钾素表现出指数级爆炸性增加,表明施用生物炭越多,土壤钾离子增量越高。土壤水溶性钾、速效钾、有效钾、交换性钾含量对生物炭的响应相似,均为生物炭添加量较低时差异不大,生物炭施用量越多,土壤钾素增幅越快。

施用生物炭后,作物产量提高,可能和生物炭改变土壤容重、含水量、孔隙度等因素有关。殷晓燕认为,土壤理化性质因施加生物炭而改变,这就使土壤有害物质活性下降,促进洋葱增量,提高经济效益<sup>[12]</sup>。邵光成研究发现,生物炭改变土壤的通气状况,进而增加番茄产量<sup>[13]</sup>。

钾肥是土壤三大肥料之一,土壤钾素含量影响作物生长。生物炭对作物产量的影响也和本文生得出生物炭对土壤钾素的影响结果一致,均是在土壤钾素含量高时,作物产量大。杨彩迪研究发现,生物炭可以改变土壤酸碱度,增加土壤交换性钾离子含量,显著提高油菜等作物产量<sup>[14]</sup>。柳开楼通过盆栽试验研究发现,生物炭显著提高土壤速效钾含量,显著提高烟叶品质和产量<sup>[15]</sup>。

### 4 结 语

(1) 生物炭具有改变土壤机械稳定性团聚体组成的作用,

土壤 7~5.5~3.0~0.25 mm 粒径机械稳定性团聚体含量变化显著。施用生物炭后,机械稳定性团聚体稳定程度提高。施用生物炭于土壤中,显著降低土壤机械稳定性微团聚体比例,土壤机械稳定性大团聚体比例显著增加。施用生物炭显著改变土壤 0.5~0.25、1~0.5 mm 粒径水稳性团聚体含量。添加生物炭后,土壤水稳性团聚体稳定性未发生明显改变。

(2) 生物炭施用量和土壤钾素表现出指数回归关系。

(3) 添加生物炭后,生菜产量显著升高,植株鲜重增加 0.33~2.23 g。并且生物炭施用量和作物产量呈正相关关系。考虑到生物炭的制作成本,在陕西杨凌地区,推荐施用 30 或 50 t/hm<sup>2</sup> 生物炭。 □

#### 参考文献:

- [1] 侯新村,胡艳霞,孙宇,等. 生物炭添加对滨海盐土柳枝稷生长的影响[J]. 中国草地学报, 2020: 1-7.
- [2] 悦飞雪,李继伟,乔鑫鑫,等. 生物炭对豫西丘陵区农田土壤团聚体稳定性及碳、氮分布的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 265-272.
- [3] 黄伟濛,秦海龙,卢瑛,等. 香蕉茎秆及其生物炭对珠江三角洲土壤团聚体特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2020: 1-8.
- [4] 董彩琴,黄辉,黄爽,等. 猪粪和猪粪渣生物炭理化性质及铜吸附性能研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(08): 105-112.
- [5] 栾江,仇宏伟,赵静. 中国农业生产中化肥过度使用状况及地域分布差异[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2018, 35(1): 40-48.
- [6] WANG L, SUN J, ZHANG Z, et al. Winter wheat grain yield in response to different production practices and soil fertility in northern China[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 176: 10-17.
- [7] 谷红霞. 出口卡特尔与中国钾肥进口定价权的研究[D]. 对外经济贸易大学, 2014.
- [8] 中科院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [10] 彭启超,刘小华,罗培宇等. 不同原料生物炭对氮、磷、钾的吸附和解吸特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10): 1763-1772.
- [11] 廖宗族,郑俊兰. 土温对土壤和玉米幼苗中钾元素的影响[J]. 中国农业科学, 1981(6): 56-64.
- [12] 殷晓燕,程志国,冯涛,等. 施用生物炭对灌漠土壤理化性质及洋葱产量的影响[J]. 中国水土保持, 2019(12): 83-86.
- [13] 邵光成,高阳,林洁,等. 生物炭对不同地下水水位番茄需水规律与产量的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 250-258.
- [14] 杨彩迪,宗玉统,高卢升. 不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响[J]. 环境科学, 2019: 1-8.
- [15] 柳开楼,胡惠文,叶会财,等. 红壤区施用稻草源生物炭对烟叶钾含量的影响[J]. 热带作物学报, 2018, 39(12): 2350-2354.

(上接第 91 页)

- [12] 刘泽航. 农村生活污水排放标准的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2012: 1-58.
- [13] 聂娟娟. 关中农村生活污水处理工艺评价与选择[D]. 西安: 西北大学, 2016: 1-68.

- [14] 环境保护部华南环境科学研究所. 第一次全国污染源普查城镇生活源产排污系数手册[S]. 国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室, 2008.
- [15] 张磊,裴国霞,张玉华,等. 华北平原地区农村生活污水产污特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2): 410-415.